

THE EFFECT OF Cu CONCENTRATION ON UNIDIRECTIONAL SOLIDIFICATION PROCESS FOR MICRO STRUCTURE OF Al-Cu ALLOY.

Sugeng Slamet¹

Abstract

The objective of this research are to study the influence of Cu concentration on Al-Cu Alloy toward columnar microstructure and mechanical properties to pass unidirectional solidification process with free convection method.

Al-(2,2; 3,1; 4,4; and 4,7wt%Cu) in hypoeutectic alloy, were melted in the crucible furnace up to 700 °C and poured in the die mold stainless steel (100 mm length and in diameter 5 mm). Unidirectional solidification was done with remelting Al-Cu in die mold that gave 7 mm in thick clay isolation, it used electric furnace up to 700 – 710 °C. Cooling process was done with water over chiller metal lighted under die mold. Material was tested namely microstructure, hardness and tensile strength test.

The result shows that the increasing Cu concentration step columnar-dendrite microstructure forming on Al-(4,4 and 4,7wt%Cu), while Cu concentration (2,2 and 3,1wt%Cu) do not form columnar-dendrite microstructure.

Keywords: *unidirectional solidification, free convection, columnar-dendrite.*

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Penelitian di bidang material teknik telah berkembang sangat pesat. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mendapatkan material yang mempunyai sifat-sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan dan ketahanan aus yang optimal untuk aplikasi tertentu. Perbaikan sifat mekanis suatu bahan dapat dilakukan melalui beberapa cara baik melalui perlakuan panas, pengerasan endapan maupun rekayasa pembekuan (Amstead, 1989).

Rekayasa dengan metode pembekuan searah adalah proses untuk meningkatkan terbentuknya *dendrite arm spacing* dan menurunkan kekasaran butir terutama pada daerah *hypoeutectic* (Oakwood dkk, 2002) serta mengarahkan pertumbuhan butir menjadi searah (*columnar*) dengan mengatur laju aliran kalor (Smith dkk,1967; Campbell,1991). Metode ini dapat meningkatkan sifat mekanis material dalam hal ketangguhan, kekuatan tarik dan kekuatan mulur (Axmann, 1983; Piwonka,1992; Kim,dkk,2000).

Aluminium murni memiliki kekuatan dan sifat mekanis yang rendah, maka untuk memperbaiki sifat-sifat mekanisnya harus dipadu dengan unsur lainnya. Penambahan tembaga

¹ Staf Pengajar Fakultas Teknik Universitas Muria Kudus

pada paduan Al-Cu akan memperbaiki kekuatan dan kekerasan baik dengan proses cor ataupun perlakuan panas. Aluminium dengan penambahan konsentrasi 4% sampai dengan 6% tembaga akan meningkatkan kekuatan terhadap perlakuan panas. Di sisi lain, penambahan tembaga pada paduan Al-Cu akan menurunkan ketahanan korosi, ketahanan retak panas (*hot tear*), mengurangi keuletan bahan dan menurunkan mampu cor paduan (Rooy, 1992 ; Malau, 2000).

Paduan Al-Cu digunakan untuk konstruksi keling, konstruksi badan pesawat terbang, *frame window*, dan baling-baling kapal. Untuk aplikasi khusus pada bagian komponen mesin yang berputar seperti sudu-sudu (*blades*) turbin gas sangat dibutuhkan orientasi butir searah sehingga mampu menahan beban aksial, tahan terhadap temperatur tinggi dan memiliki kekuatan mulur yang tinggi. Banyaknya batas butir dan orientasi butir yang acak (*equiaxed*) akan mengurangi kekuatan material logam pada temperatur tinggi (Piwonka, 1992).

Pada penelitian ini akan diteliti pengaruh konsentrasi Cu pada pembekuan searah terhadap struktur mikro dan sifat mekanis paduan Al-Cu.

B. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian tentang pembekuan searah dilakukan dengan metode pembekuan Bridgman (Stone dkk, 1998; Gunduz dkk, 2001; Roviglione dkk, 2002; Oakwood dkk, 2002; dan Amauri dkk, 2002). Metode ini cukup sederhana untuk mengamati daerah pembekuan, kecepatan, dan pengukuran parameter yang terkait seperti gradien temperatur pada cairan dan kenaikan temperatur pada setiap fasa. Pembekuan Bridgman menggunakan tabung refraktori yang di dalamnya ditempatkan cetakan dari bahan silikon karbid (SiC). Temperatur operasional metode pembekuan Bridgman adalah di bawah 850 °C dan didinginkan secara lambat dengan menggunakan fluida air.

Metode lain yang dikembangkan adalah proses pembekuan searah konveksi alami (Fredriksson, 1981; Gonzales dan Rappaz, 2006). Pembekuan konveksi alami menggunakan cetakan dari logam stainless steel dengan diameter 50 mm dan panjang 100 mm yang dilapisi bahan keramik boron nitrid setebal 0,8 mm. Metode pendinginannya menggunakan air yang disemprotkan (*water jet spray*) pada bagian bawah cetakan.

Besarnya laju pembekuan sangat menentukan struktur butir yang terbentuk. Penurunan laju pembekuan dapat meningkatkan pertumbuhan butir kolumnar-dendrit (Smith dkk, 1967; Gunduz dkk, 2001; Oakwood dkk, 2002).

Konsentrasi unsur pada paduan akan mempengaruhi pembentukan struktur butir dendrit. Pada paduan Al-Cu perubahan struktur dendrit akan mulai berpengaruh pada

temperatur 973 K. Konsentrasi Zn yang rendah (<30 % berat) pada paduan Al-Zn, lebih sulit terbentuk struktur butir dendrit pada daerah eutektik (Gonzales dan Rappaz, 2006).

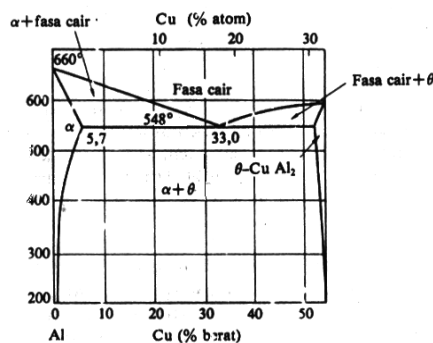
Pengaruh gradien temperatur (G) dan laju pembekuan (V) yang rendah pada masing-masing konsentrasi akan meningkatkan *primary dendrite arm spacing* (λ_1), *secondary dendrite arm spacing* (λ_2), *dendrite tipe radius* (R), dan *mushy zone depth* (d) (Kou, 1987; Gunduz dkk, 2001).

Proses pembekuan searah akan meningkatkan sifat mekanis material seperti : kekuatan tarik, kekuatan mulur, *elongation*, (Axmann,1983; Piwonka, 1992; Kim, dkk, 2000) dan kekuatan bending (Smith dkk, 1967).

C. Landasan Teori

Al-Cu adalah kombinasi dari logam aluminium yang mempunyai sifat ringan, tahan korosi, mudah dimesin, dengan tembaga yang mempunyai sifat penghantar listrik yang baik, keuletan yang tinggi dan juga sifat tahan korosi (Surdia dan Saito,1992).

Paduan Al-Cu dapat digolongkan dalam tiga jenis yaitu *hypoeutectic*, *eutectic* dan *hypereutectic*.



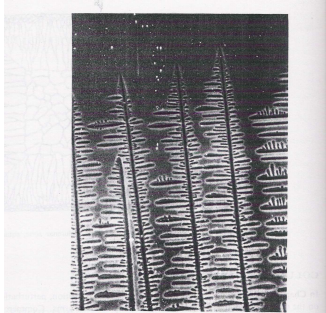
Gambar 1. Diagram fase binary Al-Cu (Surdia dan Saito, 1992).

Gambar 1. menunjukkan paduan Al-Cu dengan komposisi tembaga < 33% disebut *hypoeutectic*. Titik *eutectic* pada paduan Al-Cu terdapat pada kandungan Cu sebesar 31,9 sampai 32,9%. Sedangkan kandungan tembaga >33,0% disebut *hypereutectic* (Murray, 1985).

Proses pembekuan logam terjadi melalui mekanisme pengintian dan pertumbuhan, juga terjadi proses difusi dimana terjadi pergerakan atom-atom di dalam larutan. Proses difusi ini dipengaruhi oleh adanya komposisi larutan dan juga temperatur (Hill dkk, 1994).

Bentuk butir dan ukurannya sangat tergantung pada pertumbuhan butir selama proses pembekuan. Meski besar butir dinyatakan dalam ukuran diameter, sangat sedikit sekali butiran logam fasa tunggal yang bentuknya bulat. Bentuk butir lain adalah bentuk pipih, kolumnar dan dendritik (Van Vlack dan Sriati, 1983).

Selular dendrit terjadi bila gradien temperatur berkurang dan luas daerah pendinginan superkomposisi semakin dominan, karakteristiknya akan berubah menjadi struktur dendrit. Bentuk selular dengan ujung semi-lingkar akan berubah menjadi struktur dendrit dengan ujung berbentuk piramid dan bahkan berbentuk kubah. Secara keseluruhan struktur selular dendrit membentuk cabang dari jaring-jaring yang saling berhubungan satu dan lainnya.



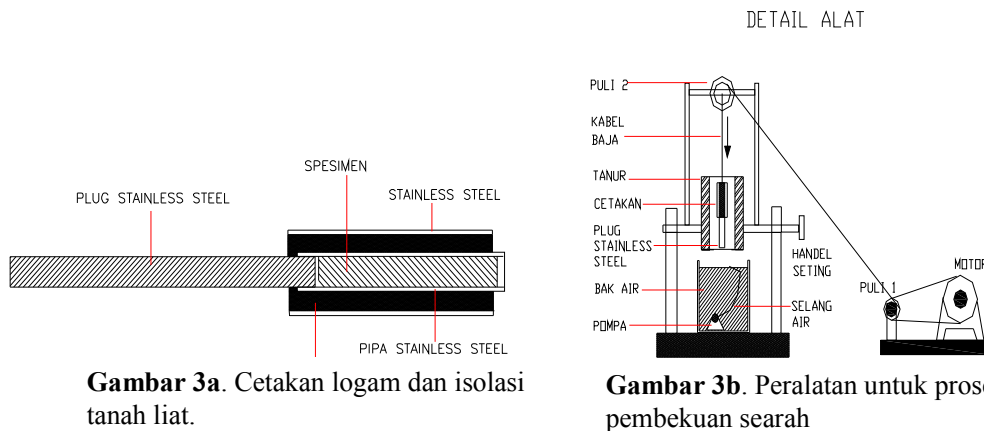
Gambar 2. Struktur kolumnar dendrit (Sindo Kou,1987)

Kolumnar-dendrit merupakan bentuk butir kristal yang menyerupai cabang pohon. Struktur kolumnar-dendrit ditunjukkan pada Gambar 2.

II. Cara Penelitian

A. Bahan dan Alat penelitian

Material yang digunakan adalah paduan Al- (4,4 dan 4,7%Cu) sebagai *master alloy*. Peralatan yang digunakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3a dan 3b.

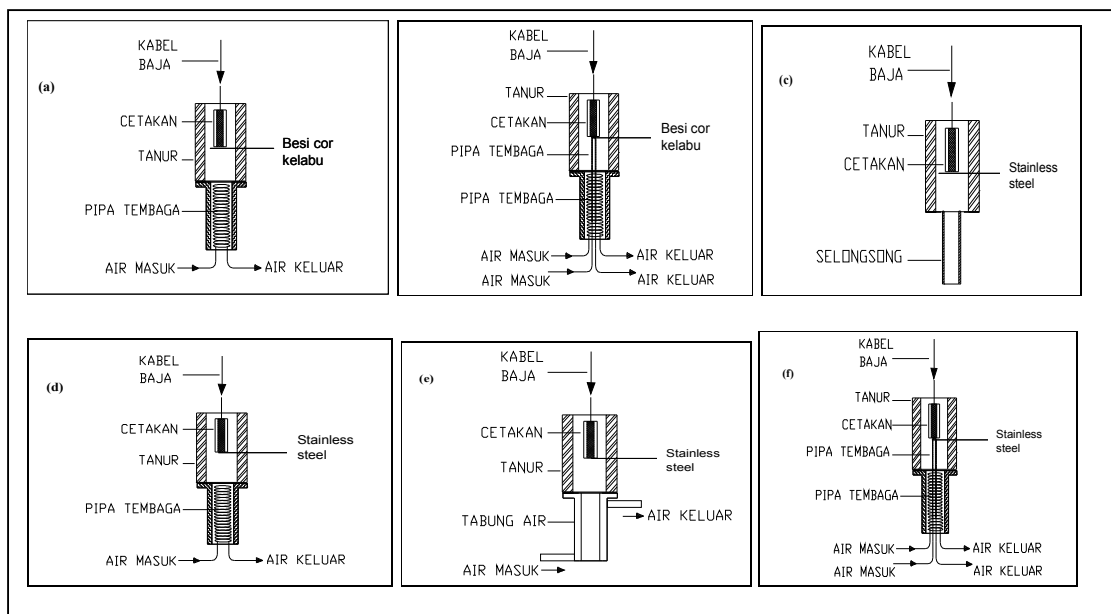


Pengujian spesimen dilakukan dengan membandingkan struktur mikro yang terbentuk pada masing-masing konsentrasi. Pengujian sifat mekanis selain dilakukan dengan membandingkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material awal dengan hasil pembekuan searah juga pada masing-masing konsentrasi Cu.

B. Proses Pembekuan Searah

Beberapa metode pembekuan dengan pendinginan lambat yang pernah dilakukan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

- Pendinginan dengan *chiller coil* dan penutup bawah cetakan dengan besi cor kelabu.
- Pendinginan dengan *chiller coil* dan *chiller* pemicu dan penutup bawah cetakan dengan besi cor kelabu.
- Pendinginan tidak menggunakan *chiller* (*non chiller*).
- Pendinginan dengan *chiller coil* dan penutup bawah cetakan dengan plat stainless steel.
- Pendinginan dengan *water tube chiller* dan penutup bawah cetakan dengan plat stainless steel.
- Pendinginan dengan *chiller coil* dan *chiller* pemicu di bawah cetakan serta penutup bawah cetakan dengan plat stainless steel.

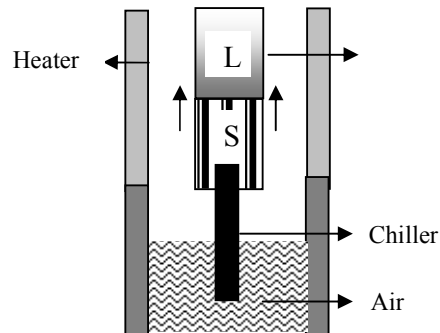


Gambar 4. Beberapa metode pendinginan lambat proses pembekuan searah

C. Pembekuan searah konveksi alami (*free convection*)

- Menentukan metode konveksi alami sesuai untuk dilanjutkan Gambar 5.
- Membuat paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) dengan cara menurunkan kandungan tembaga pada material awal Al- 4,7%Cu dengan menambahkan Al 99% dengan metode perbandingan berat.

- c. Melakukan uji komposisi setiap paduan Al-Cu sesuai konsentrasi Cu yang diinginkan.
- d. Melebur setiap material uji tersebut dalam dapur *crucibel* dan diukur temperaturnya sampai 700 °C. Selanjutnya dituang dalam cetakan logam dengan diameter dalam 6 mm, diameter luar 7 mm dan panjang 100 mm.
- e. Membuat spesimen pembekuan searah dengan cara melapisi cetakan dengan tanah liat setebal 7 mm dan ditutup dengan slop pipa *stainless steel*, di bagian bawah cetakan ditutup plug *stainless steel* panjang 200 mm yang sekaligus berfungsi sebagai *chill*.
- f. Melakukan peleburan kembali dalam dapur listrik sampai temperatur 700-710 °C.
- g. Melakukan proses pendinginan dengan jalan mencelup sebagian plug/*chill stainless steel* \pm 5 cm kedalam bak air sehingga terjadi mekanisme penurunan gradien temperatur, dimana logam cor di dalam cetakan mengalami laju pendinginan lambat. Dari hasil perhitungan laju aliran kalor konveksi alami sebesar 9643,26 Kj/s. Untuk menjaga temperatur air agar tetap stabil pada bak pendingin dipasang pompa air.
- h. Mematikan semua sumber panas dalam dapur listrik dan melakukan penahanan pendinginan selama 10 menit atau dengan cara mengukur temperatur dapur listrik mencapai \pm 548 °C.
- i. Memotong melintang sepanjang 60 mm dan membujur dengan diameter 5 mm, untuk specimen uji kekerasan dan mikrostruktur. Sementara untuk pengujian tarik dilakukan dengan membubut cetakan sekaligus untuk dibuat spesimen sesuai ASTM B 557M.
- j. Melakukan pembahasan didasarkan pada mikro struktur yang terbentuk, uji kekerasan dan uji tarik pada masing-masing konsentrasi paduan Al-Cu.



Gambar 5. Mekanisme pembekuan searah konveksi alami

III. Hasil dan Pembahasan

A. Komposisi kimia *master alloy*

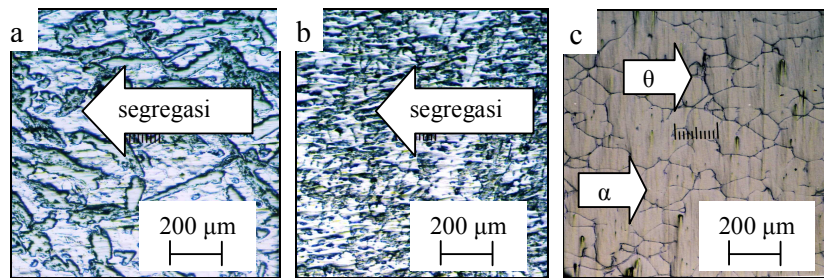
Al-(4,4 dan 4,7%Cu) sebagai *master alloy* dalam bentuk ingot dipotong ukuran 2 x 2 cm untuk spesimen uji komposisi. Tabel 4.1 menunjukkan hasil uji komposisi *master alloy* Al-(4,4 dan 4,7%Cu).

Tabel 1. Komposisi kimia paduan (%)

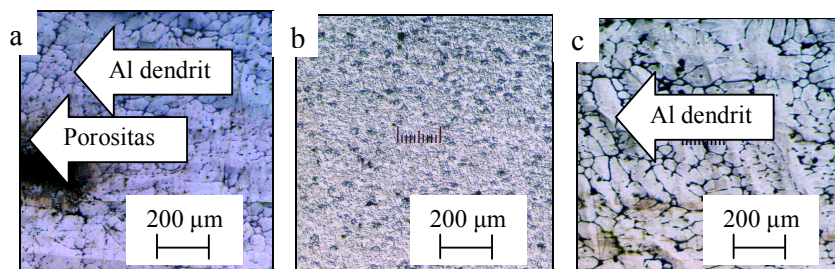
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,46	0,098	4,45	0,000	0,498	0,035	0,003	0,047	0,0003	0,004	0,008	94,39
0,12	0,1468	4,767	0,0135	0,0071	0,0868	0,0085	0,0082	0,0013	0,0039	0,0089	94,83

B. Pengamatan struktur mikro dengan beberapa cara pendinginan

Struktur mikro Al-4,7%Cu dengan menggunakan beberapa metode pendinginan lambat ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. (a) Pendinginan dengan *chiller coil* dan penutup bawah cetakan dengan besi cor kelabu, (b) Pendinginan dengan *chiller coil* dan *chiller* pemicu dan penutup bawah cetakan dengan besi cor kelabu dan (c) Pendinginan tanpa *chiller* (*non chiller*).



Gambar 7. (a) Pendinginan dengan *chiller coil* dan penutup bawah cetakan dengan plat stainless steel, (b) Pendinginan dengan *chiller water tube* dan penutup bawah cetakan dengan plat stainless steel, (c) Pendinginan dengan *chiller coil* dan *chiller* pemicu di bawah cetakan serta penutup bawah cetakan dengan plat stainless steel.

Penambahan *chiller* pemicu di bawah cetakan menunjukkan peningkatan struktur mikro kolumnar dendrit dan tidak terjadi porositas, sementara pada pendinginan dengan *water tube chill* segregasi lebih kecil dan struktur mikro butir relatif lebih halus. Struktur butir Al

dendrit terbentuk pada pembekuan dengan laju pendinginan relatif lambat (*chiller coil*) dengan arah yang masih acak dengan prosentase *secondary dendrite* lebih banyak daripada *primary dendrite* (Smith dkk, 1967 ; Oakwood dkk, 2002 ; Amauri dkk, 2002). Awal nukleasi terbentuk dari dinding cetakan dengan pertumbuhan ke arah tengah cetakan (Fleming,1974).

C. Pembekuan searah dengan metode pendinginan lambat konveksi bebas

1. Komposisi kimia beberapa konsentrasi Cu

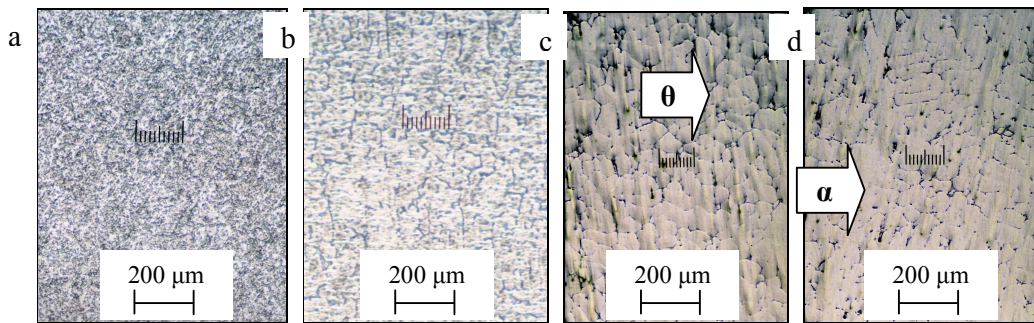
Pembuatan paduan Al-Cu dengan beberapa konsentrasi dilakukan dengan menambahkan Al 99% dalam *master alloy* Al-4,7%Cu dengan perbandingan prosen berat. Tabel 4.2 menunjukkan komposisi paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) setelah dilakukan uji dengan *spectrometer*.

Tabel 2. Komposisi kimia paduan (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Al
0,1	0,224	2,22	0,009	0,005	0,065	0,015	0,004	0,0008	0,002	0,004	97,35
0,12	0,287	3,19	0,009	0,006	0,071	0,015	0,006	0,0014	0,004	0,008	96,28

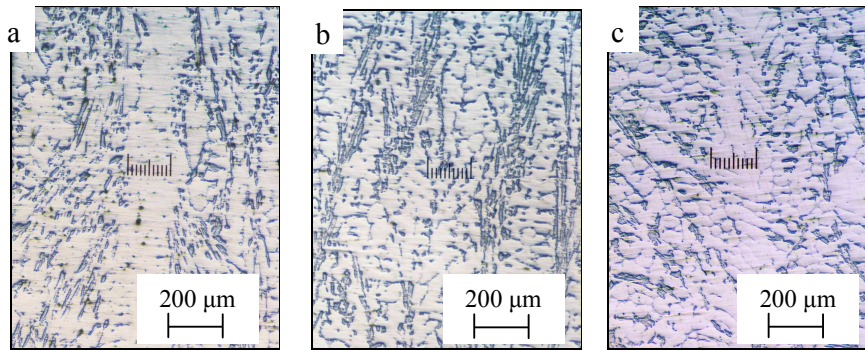
2. Pengamatan struktur mikro

Gambar 8. menunjukkan struktur mikro material awal dengan variasi konsentrasi Al-(2,2; 3,2; 4,4 dan 4,7 % Cu). Struktur mikro pada material awal masih didominasi bentuk butir *equiaxed* dengan α adalah fase aluminium dan θ adalah fase tembaga.

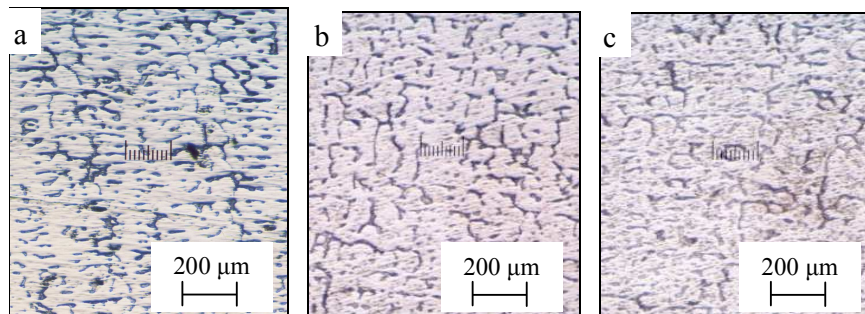


Gambar 8. Struktur mikro material awal (a) Al-4.7 %Cu, (b) Al-4.4 %Cu, (c) Al-3,1 %Cu, (d) Al-2,2 %Cu.

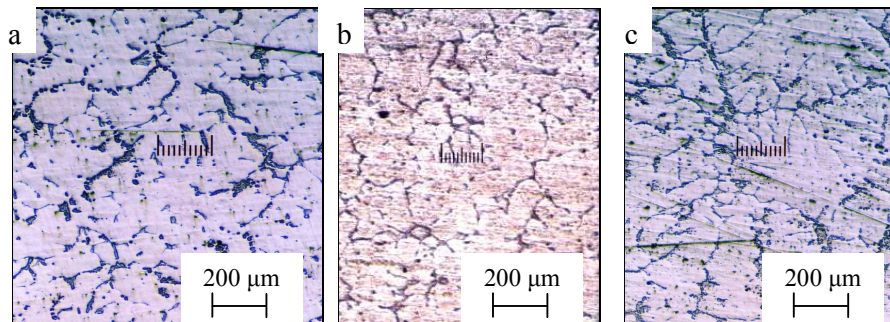
Sedangkan struktur mikro hasil pembekuan searah pada jarak potongan 20 mm, 40 mm dan 60 mm dari pangkal cetakan ditunjukkan pada Gambar 9. sampai Gambar 12. Proses pembekuan searah menghasilkan bentuk butir kolumnar yang meliputi *primary dendrite* dengan arah vertikal dan cabang-cabang kearah samping adalah *secondary dendrite* (Fleming, 1974; Kurz, 1981) sebagaimana ditunjukkan pada paduan Al-(4,7 dan 4,4%Cu).



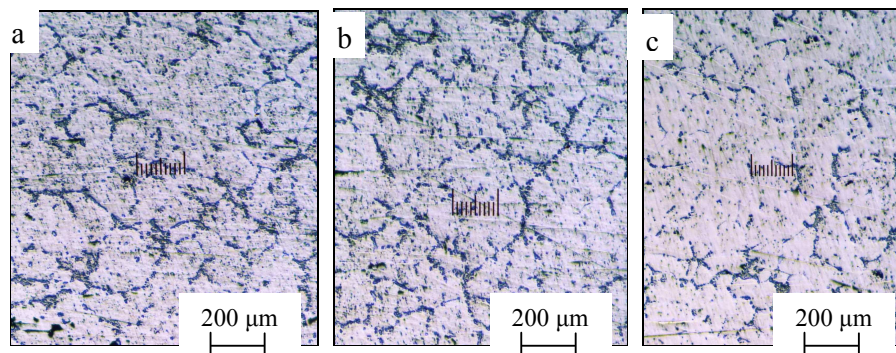
Gambar 9. Struktur mikro pembekuan searah Al-4,7%Cu pada jarak dari pangkal cetakan (a) 20 mm (b) 40 mm dan (c) 60 mm



Gambar 10. Struktur mikro pembekuan searah Al-4,4%Cu pada jarak dari pangkal cetakan (a) 20 mm (b) 40 mm dan (c) 60 mm



Gambar 11. Struktur mikro pembekuan searah Al-3,1%Cu pada jarak dari pangkal cetakan (a) 20 mm (b) 40 mm dan (c) 60 mm



Gambar 12. Struktur mikro pembekuan searah Al-2,2%Cu pada jarak dari pangkal cetakan (a) 20 mm (b) 40 mm dan (c) 60 mm

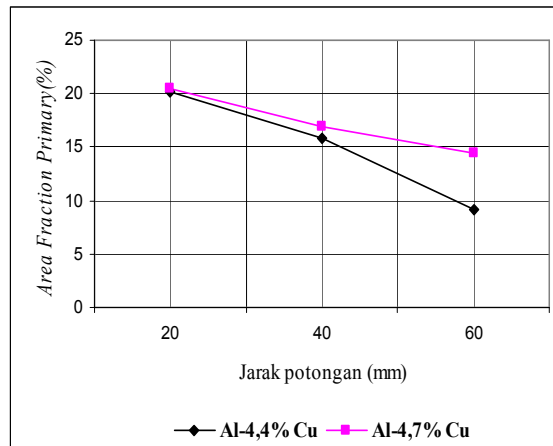
Pengaruh konsentrasi Cu pada pembentukan struktur mikro kolumnar cukup besar, paduan Al-4,7 %Cu struktur mikro kolumnar terbentuk memanjang diikuti terbentuknya struktur serpih kasar (*platelike*) dan segregasi., sedangkan pada Al-4,4%Cu memperlihatkan adanya segregasi yang mengumpul pada batas butir, tidak dijumpai adanya butir serpih kasar.

Sementara itu struktur mikro Al-(2,2 dan 3,1 %Cu) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11. dan 12. tidak menunjukkan terbentuknya struktur mikro kolumnar. Segregasi pada daerah batas butir menurun seiring penurunan konsentrasi Cu pada paduan (Piwonka, 1992). Struktur mikro pada paduan Al-(2,2 dan 3,1 %Cu) juga memperlihatkan 33 s butir yang cukup jelas.

1. Menentukan *Area Fraction Primary*

Gambar 4.8 merupakan grafik yang menunjukkan prosen fase *area fraction primary* pada beberapa jarak potongan dari pangkal cetakan 20 mm, 40mm dan 60 mm dari hasil pengamatan struktur mikro pembekuan searah pada paduan Al-(4,4 dan 4,7 %Cu). Sementara paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) tidak terbentuk struktur kolumnar, sehingga tidak dapat dihitung prosen *area fraction primary* nya.

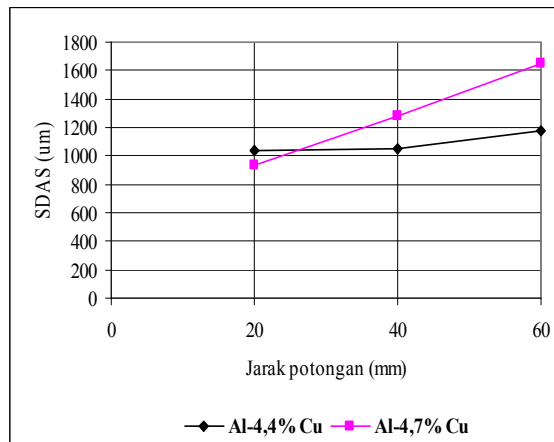
Penurunan *area fraction primary* terjadi seiring penurunan konsentrasi Cu serta semakin jauh dari pangkal cetakan. Paduan Al-4,7%Cu terjadi penurunan sebesar 16,95% dari jarak potongan 20 mm sampai jarak 40 mm dan 14,76% dari jarak potongan 40 mm sampai 60 mm dari pangkal cetakan. Sementara itu Al-4,4% Cu mengalami penurunan sebesar 21,48% dari jarak potongan 20 mm sampai jarak 40 mm dan 42,77% dari jarak potongan 40 mm sampai 60 mm dari pangkal cetakan.



Gambar 4.8 Jarak potongan (mm) dan *Area Fraction Primary* (%).

2. Menentukan *Secondary Dendrit Arm Spacing*

Grafik yang memperlihatkan besarnya *secondary dendrite arm spacing* pada beberapa jarak potongan dari pangkal cetakan paduan Al-(4,4 dan 4,7%Cu) ditunjukkan pada Gambar 4.9. *Secondary dendrite arm spacing* meningkat pada Al-4,7%Cu dibandingkan Al-4,4%Cu pada jarak potongan 40 mm maupun 60 mm dari pangkal cetakan. Sedangkan *secondary dendrite arm spacing* pada jarak potongan 20 mm Al-4,7%Cu relatif lebih rendah dibanding Al-4,4%Cu.

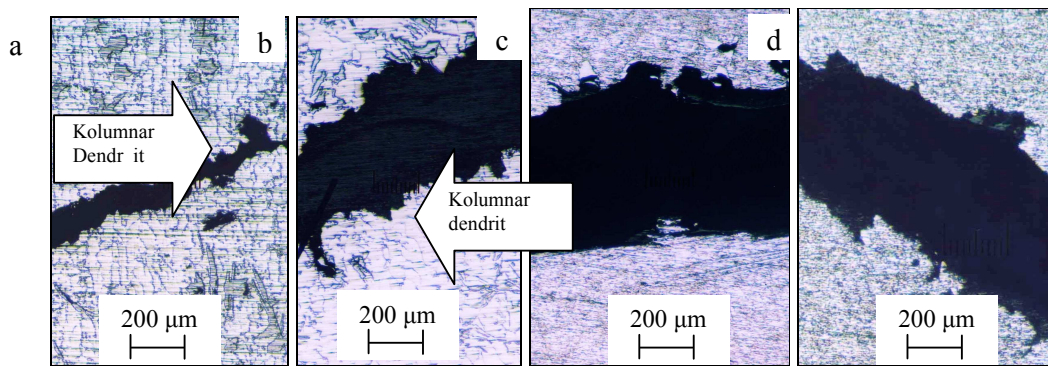


Gambar 4.9 Jarak potongan (mm) dengan *Secondary Dendrit Arm Spacing* (μm).

Peningkatan SDAS paduan Al-4,7%Cu sebesar 27,17% dari jarak 20 mm sampai jarak potongan 40 mm dan 22,25% dari jarak 40 mm sampai jarak 60 mm dari pangkal cetakan. Al-4,4%Cu mengalami peningkatan SDAS pada jarak potongan 20 mm sampai 40 mm sebesar 1,25% dan 10,51% pada jarak potongan 40 mm sampai 60 mm dari pangkal cetakan.

3. Struktur mikro patahan tarik

Gambar 16 (a) dan (b) memperlihatkan terjadinya patahan tarik pada struktur mikro kolumnar dendrit. Paduan Al-(2,2 dan 3,1%Cu) terjadinya patahan akibat beban tarik disebabkan pengkasaran butir dan segregasi. Sementara patahan tarik paduan Al-(4,4 dan 4,7%Cu) terjadi pada daerah dimana adanya pengumpulan segregasi di sekitar butir kolumnar dendrit.



Gambar 16. Bentuk patahan tarik pembekuan searah (a) 4,7%Cu, (b) 4,4%Cu, (c) 3,1%Cu, (d) 2,2%Cu.

IV. KESIMPULAN

a. Kesimpulan

1. Konsentrasi Cu mempengaruhi terbentuknya struktur mikro paduan Al-Cu. Al-(4,4 dan 4,7 %Cu) menunjukkan struktur mikro kolumnar, sedangkan Al-(3,1 dan 2,2 %Cu) sulit terbentuk struktur butir kolumnar, hanya menyebabkan perbesaran ukuran butir dan segregasi pada batas butir.
2. Luas *primary dendrit* menurun seiring penurunan konsentrasi Cu dan semakin tingginya laju pendinginan dari pangkal cetakan, sementara *secondary dendrit arm spacing* meningkat pada paduan Al-(4,4 dan 4,7%Cu).

DAFTAR PUSTAKA

- Axmann, W., 1983, "Dynamic Directional Solidification", Workshop RWTH Aachen, pp.71-95.
- Amstead, B.H dkk., 1989, "Teknologi Mekanik" edisi 7, Erlangga, Jakarta, pp.156-157.
- Amauri, G., dkk, 2002, "Theoretical – Experimental Analysis of Cellular and Primary Dendritic Spacing during Unidirectional Solidification of Sn-Pb Alloys", UNICAMP 13083-970 Campinas - SP, Brazil.
- Campbell, J., 2000, "Castings", University of Birmingham, pp. 125 – 138.
- Fleming, M.C., 1974, "Solidification processing", Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp.181-183.
- Fredriksson, H., 1981, "Influence of Free Convection On Dendritic Growth, RWTH Aachen, Lausanne, pp.138-168.

- Gonzales, F., dan Rappaz, M., 2006, “Dendrite Growth Directions in Aluminium-Zinc Alloys”, Lausanne- Switzerland, pp.2797-2806.
- Gunduz, M., and Cadirh, E., 2001, “Directional solidification of Aluminium-Copper alloys”, Elsevier, pp.167-185.
- Kim, M.H., Jung, C.H., dkk, 2000, “The Effects of Ti and Sr on the Microstructures of Al-11,3 wt.%Si Alloys Produced by Ohno Continuous Casting”, Volume 6, Metals and Materials Korea, pp. 235-240.
- Kurz, W., 1981, “Dendritenwachstum Bei Gerichteter Erstarrung Von Legierungen Spitzenwachstum Und Primarabstand”, RWTH Aachen, Lausanne, pp.57-72.
- Murray, J.L., 1985, “Binary Alloy Phase Diagrams”, Int.Met.Rev.Trans. Metal.Soc.AIME.
- Malau, V., 2000, “Bahan Teknik”, Teknik Mesin UGM, Yogyakarta pp.19-23.
- Oakwood, T.G., Goodrich, G.M., 2002, “Role of Gravity Forces on the Directional Solidification of Gray Cast Iron”, American Foundry Society, USA, pp.1-17.
- Piwonka, S., 1992, “Aluminum and Aluminum Alloys”, Volume 15, Ninth edition, ASM Handbook, USA, pp.700-705.
- Robert, E., Reed-Hill, Reza Abbaschian, 1994, “Physical Metallurgy Principles”, Third Edition, PWS Publishing Company, Boston, pp.168 dan 421-439.
- Rooy, E.L., 1992, “Aluminum and Aluminum Alloys”, Volume 15, Ninth edition, ASM Handbook, USA, pp.1631-1634.
- Roviglione, A.N., and Hermida, J.D., 2002, “A New Directional Solidification Method to Study Gray Cast Iron”, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina, pp.235.
- Smith, L., and Beeley, P.R., 1967, “Controlled directional solidification of steel”, Leeds University, pp.330-333.
- Sindo Kou, 1987, “Welding Metallurgy”, John Wiley and Sons, Wisconsin, pp.129-140.
- Surdia dan Saito, S., 1992, “Pengetahuan bahan teknik”, P.T. Pradnya Paramitha, Jakarta, pp. 135.
- Stone, I.C., Jones, H., 1998, “Improved techniques for the production of remelt feedstock for Bridgman directional solidification of aluminium alloys”, Chapman & Hall, pp.19-21.
- Van Vlack, H., Lawrence, dan Djaprie, S., 1983, “Ilmu dan Teknologi Bahan”, Erlangga, Jakarta, pp.225-231.